اثر آستمپرینگ دما پایین بر ساختار، خواص مکانیکی و سایشی فولاد AISI 52100★

مهرداد نوربخش[۱]　　مجید طاووسی[۲]　　سید رحمان حسینی[۳]

چکیده

هدف از این تحقیق برر سی اثر دما و زمان فرایند آ ستمپرینگ بر خواص ساختاری و مکانیکی فولاد AISI 52100 می‌با شد. در این را ستا در نمونه‌ها آ ستنیته شده و سپس عملیات آ ستمپرینگ در شرایط مختلف دنبال شد. برر سی‌های فازی، ساختاری و مکانیکی تو سط پراش سنج پرتوایکس، میکرو سکپ الکترونی روبشی، آزمون کشش و سایش انجام شد. نتایج نشان داد که در دمای آ ستمپرینگ بالاتر از ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، استحکام و درصد ازدیاد طول به ترتیب به بیش از ۲۰۰۰ مگاپاسکال و ۷ درصد می‌رسد. استحکام و انعطاف‌پذیری با افزایش دما به ترتیب به حدود ۱۸۰۸ مگاپاسکال و ۳ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی فولاد نانوساختار، بینیت، ISI 52100، آستمپرینگ کنترل‌شده، استحاله هم‌دما.

The Effect of Low Temperature Austempering on Microstructure, Mechanical and Wear Properties of AISI 52100 Steel

M. Nourbakhsh　　M. Tavoosi　　S. R. Hosseini

Abstract

The goal of this study was to develop nano/ultrafine bainitic microstructure in AISI 52100 steel. For this purpose, the specimens were austenitized, followed by austempering treatment at different temperatures and times. Austempered samples were characterized using field emission scanning electron microscopy, X-ray diffraction and tension and wear tests. The results showed, at austempering temperature up to 250ºC, the strength and ductility reached 2000 MPa and 7%, respectively. By further increasing the austempering temperature, the strength and ductility were simultaneously reduced (to about 1808MPa and 3%).

Keywords Nanostructured Steel, Bainite, AISI 52100, Controlled Austempering, Isothermal Transformation.

★ نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹٤/۷/۱۱ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۵/۱۰/۱۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان.

Email: m.tavoosi@ma.mut.ac.ir

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان.

DOI: 10.22067/ma.v30i1.50300

مقدمه

حداکثر استحکام کششی قابل دست‌یابی در آلیاژهای آهنی با استفاده از روش‌های متداول استحکام‌بخشی از قبیل تشکیل محلول جامد، کارسختی و ایجاد ریزساختار مارتنزیتی در حدود ۱۷۰۰ مگاپاسکال است [1-3] به‌منظور دست‌یابی به مقادیر استحکام کششی بیش‌تر، لازم است از روش‌های جدید و سازوکارهای نوین استفاده شود. به‌عنوان یکی از این سازوکارها می‌توان به ایجاد ساختار نانو اشاره کرد. با ریزکردن ساختار تا ابعاد نانو می‌توان استحکام کششی را بدون تاثیر قابل توجه بر چقرمگی، تا حدود ۲۵۰۰ مگاپاسکال افزایش داد [4].

تا کنون روش‌های مختلفی همچون تغییر شکل مومسان شدید (SPD)، عملیات حرارتی–مکانیکی، نورد تبریدی و نوردتجمعی برای کاهش اندازه دانه‌های کریستالی فولادها و حصول اندازه دانه‌های نانومتری ارائه شده است. نکته قابل توجه در مورد تمامی این روش‌ها هزینه بالا و نیاز به فرایندهای تکمیلی می‌باشد که استفاده از آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی محدود نموده است [5]. با توجه به این موارد، در حال حاظر نسل جدیدی از فولادها تحت عنوان فولادهای نانوساختار بینیتی/سوپر بینیتی در حال گسترش است.

فولادهای نانوساختار بینیتی، با انجام یک استحاله آستمپرینگ در دماهای پایین و در زمان طولانی به‌دست می‌آید. میکروساختار حاصل از این استحاله، نمونه‌ی جدیدی از میکروساختار بوده و شامل ساختار لایه‌ای از فریت بینیتی و آستنیت غنی از کربن می‌باشد. به دلیل انجام استحاله آستمپرینگ در دماهای پایین (کمی بالاتر از دمای شروع مارتنزیت (Ms)) قابلیت نفوذ کربن پایین بوده و به همین دلیل ضخامت صفحات فریت بینیتی و آستنیت لایه‌ای بسیار کم خواهد بود. خواص مکانیکی فولادهای نانوساختار بینیتی به‌طور قابل توجهی متأثر از ضخامت صفحات فریت بینیتی و آستنیت لایه‌ای است [6,4-8]. با در نظر گرفتن ضخامت واقعی لایه‌ها به صورت t، تقاطع خطی میانگین دو برابر ضخامت لایه‌ای ($\bar{L}$ =۲t) بوده و استحکام کششی معادل $\Delta\sigma = 115(\bar{L})^{-1}$ خواهد بود [8]. با توجه به این رابطه با کاهش ضخامت صفحات فریت بینیتی و آستنیتی، استحکام به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که این کار با انجام فرایند در دماهای پایین و کنترل ترکیب شیمیایی فولاد امکان‌پذیر است. در این رابطه بادیشیا با انجام استحاله هم‌دما در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مورد فولادی با ترکیب شیمیایی Fe–0.79C–1.56Si–1.98Mn–0.24Mo–1.01Cr– 1.51Co–1.01Al به استحکام کششی در حدود ۲۵۰۰ مگاپاسکال دست یافت [٦]. تیموخینا و همکاران نیز ریزساختار فولاد نانوساختار بینیتی را در فولادی با ترکیب شیمیایی Fe–0.79C–1.98Mn–1.51Si–0.98Cr–0.24Mo–1.06Al–1.58Co (wt.%) بررسی کردند [9]. استحکام کششی و تسلیم نمونه‌های حاصل در شرایط استحاله هم‌دما در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۰ روز، به ترتیب در حدود ۲۲۰۰ و ۱۹۰۰ مگاپاسکال برآورد شد. چقرمگی شکست قابل ملاحظه، تنش‌های پسماند ناچیز، یکنواختی خواص در مقاطع بزرگ و عدم نیاز به فرایندهای تکمیلی تولید از دیگر مزایای این نوع فولادها است [6-8].

به طور کلی فولادهایی برای انجام استحاله همدما مناسب هستند که از سه شرط زیر برخوردار باشند [6,7]:

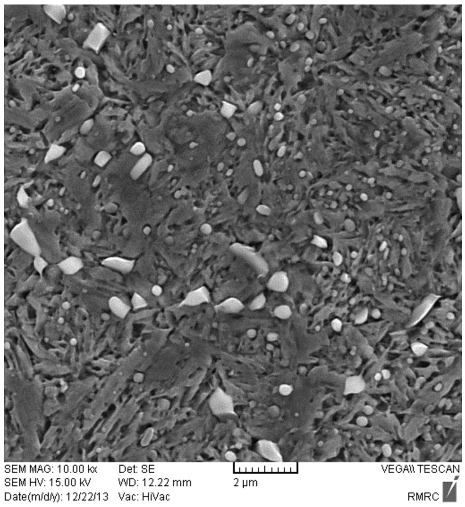
۱. دمای پایین تشکیل مارتنزیت: به دلیل انجام استحاله در دمای پایین، لازم است دمای تشکیل مارتنزیت پایین باشد تا استحاله تشکیل بینیت بدون شکل گیری فاز مارتنزیت، دنبال شود.
۲. حضور درصد بالایی از عناصر تشویق کننده تشکیل بینیت: به دلیل انجام استحاله در دمای پایین، زمان فرایند معمولا بسیار طولانی است. در این راستا توصیه می‌شود در طراحی فولاد از عناصری هم‌چون آلومینیوم و کبالت برای سرعت بخشیدن به استحاله و کوتاه کردن زمان فرایند بهره گرفته شود.
۳. حضور درصد مناسبی از عناصر پایدار کننده آستنیت: با توجه به این‌که ساختار نهایی فولادهای حاصل به

صورت صفحات فریت بینیتی و آستنیت غنی از کربن می‌باشد، لازم است آستنیت حاصل توسط مقادیر کافی از عناصری همچون منگنز و سیلیسیم پایدار شوند.

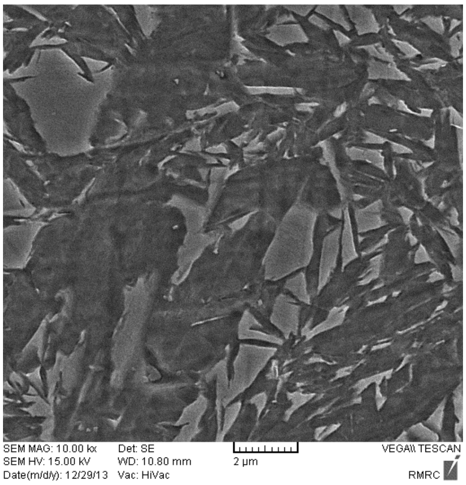
با توجه به نکات مورد بحث، برای دستیابی به یک فولاد نانوساختار بینیتی، لازم است تا ترکیب فولاد به درستی طراحی و ساخته شود که این موضوع مستلزم صرف وقت و هزینهٔ بالایی است. در این رابطه در این پژوهش تلاش گردید تا انجام استحالهٔ یاد شده در مورد فولاد AISI 52100 که تحت عنوان فولاد بربرینگ شناخته می‌شود، دنبال گردد. با وجودی که تحقیقات متعددی در زمینه بهبود خواص مکانیکی این فولاد با استفاده از فرایند آستمپرینگ وجود دارد [10-14]، زمان و دمای بهینه فرایند آستمپرینگ به منظور حصول ساختار نانوبینیتی/سوپر بینیتی به درستی تعیین نشده است. این فولاد دارای درصد بالایی کربن و کروم بوده و فاقد عناصر آلیاژی مورد اشاره است. تحقیق در مورد این فولاد می‌تواند زمینه را برای شناخت دقیق‌تر استحاله‌ی آستمپرینگ و چگونگی تحولات ساختاری در حین تشکیل بینیت فراهم آورد. در این رابطه فرایند آستمپرینگ در دماها و زمان‌های مختلفی دنبال شد و خواص فازی، ساختاری، مکانیکی و سایشی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

فولاد AISI 52100 به‌صورت میل‌گرد ریختگی و فورج‌شده به قطر ۲۲ میلی‌متر تهیه و نمونه‌سازی در مورد آن‌ها صورت گرفت. به منظور تعیین دما و زمان بهینه آستنیته کردن، نمونه‌های حاصل در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه‌سانتی‌گراد به مدت زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه آستنیته شده و سپس در آب سرد سریع سردی گردید. پس از انجام این کار، نمونه‌ها در دما و زمان بهینهٔ حاصل، آستنیته شده و به‌سرعت وارد حمام آستمپرینگ شدند. استحاله هم‌دما در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف انجام شد. استحاله هم‌دما در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در حمام روغن آبکار گرم ٦۸ ساخت شرکت بهران با دمای دود ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد و استحالهٔ هم‌دما در دماهای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در حمام نمک حاوی نیترات پتاسیم و نیترات سدیم به‌ترتیب با مقادیر ۵۵ و ٤۵ درصد وزنی انجام شد. بررسی‌های فازی نمونه‌های حاصل توسط پراش سنج پرتوایکس مدل PW3710 ساخت شرکت فیلیپس، بررسی‌های ساختاری و مورفولوژیکی توسط میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN-XMU ساخت شرکت وگا آلمان با ولتاژ ۱۵ کیلوولت انجام شد. آزمون کشش توسط دستگاه کشش آمسلر مدل FM2750 ساخت شرکت ولپرت آلمان در نرخ کرنش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و طبق استاندارد انجمن آزمون و مواد آمریکا شماره E8 انجام شد. شایان ذکر است که تعداد تکرار آزمون کشش برای هر نمونه دو مرتبه در نظر گرفته شد. البته به دلیل مشاهدی خطا، در مورد برخی از نمونه‌ها این آزمون تا سه بار نیز تکرار شد. آزمون سختی سنجی نیز با اسنفاده از دستگاه سختی سنج EMCOTEST مدل M4u-250، تحت بار ۳۰ کیلوگرم و با استفاده از فرورونده ویکرز انجام شد. در این مورد نیز ۵ آزمون در مورد هر نمونه انجام و مقدار متوسط سختی گزارش شد. جهت انجام آزمون سایش، از دستگاه سایش از نوع پین روی صفحه (موجود در آزمایشگاه تریبولوژی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان)، در شرایط سایش خشک استفاده شد. تمامی آزمون‌ها در دمای محیط با رطوبت نسبی ۲۰ تا ۳۰ درصد و با سرعت صفحه برابر با ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه انجام شد. به‌منظور تعیین میزان کاهش جرم، از ترازویی با دقت 10^{-4} گرم استفاده شد. از پین فولادی AISI 52100 با سختی ۸۰۰ ویکرز، قطر ۵ و شعاع نوک ۲/٦ میلی‌متر استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمون سایش بر روی هر نمونه سه بار تکرار شد. محدوده نیروی اعمالی توسط آزمون بارپذیری دینامیک نیز برابر با ۵ نیوتن تعیین شد.



(الف)



(ب)

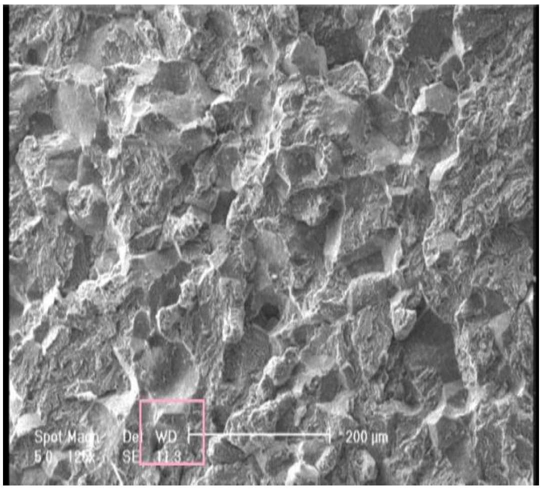
شکل ۱ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از فولاد AISI 52100 الف) نمونه خام و ب) پس از انجام آستنیته کردن در دمای ۱۰۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ٦۰ دقیقه و سرد کردن سریع در آب

نتایج و بحث

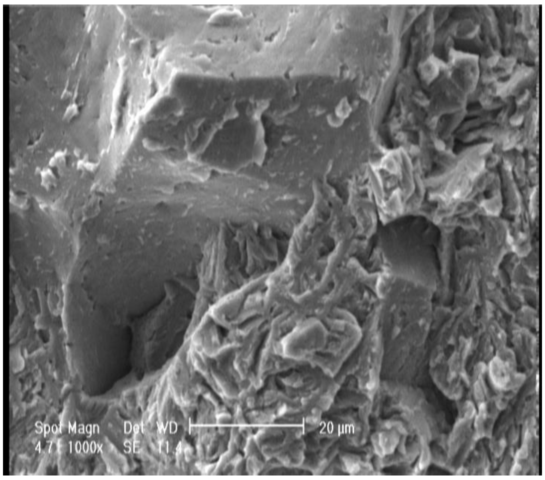
ساختار نمونهٔ خام فولاد AISI 52100 مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱–الف) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختار این فولاد متشکل از درصد بالایی کاربید کروم می‌باشد. بدین معنی که عناصر کربن و کروم موجود از ترکیب آلیاژ خارج شده و تشکیل کاربید داده‌اند. به منظور بررسی دقیق استحالهٔ تشکیل بینیت در این فولاد، در ابتدا لازم است تا تمامی کاربیدهای موجود تجزیه شده و عناصر آلیاژی در ساختار انحلال یابند. در این راستا، نمونه‌هایی از فولاد مورد بررسی در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه آستنیته شده و سپس در آب سریع‌سردی گردید. بررسی‌های ساختاری صورت گرفته در مورد این فولاد نشان داد که با انجام فرایند آستنیته کردن در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ٦۰ دقیقه، تمامی کاربیدهای موجود تجزیه شده و عناصر تشکیل دهنده‌ی آن‌ها در ساختار توزیع می‌شود (شکل ۱–ب). در واقع انجام فرایند آستنیته کردن در دماهای کمتر و زمان‌های کوتاه‌تر قادر به انحلال کامل رسوبات نمی‌باشد. در این ارتباط متوسط اندازه دانه‌های آستنیت در حدود ٤±۲۰ میکرومتر و دمای تشکیل بینیت و مارتنزیت به ترتیب در حدود ۳۱۰ و ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد برآورد شد. شایان ذکر است که برآورد دمای تشکیل بینیت و مارتنزیت با فرض انحلال کامل عناصر در زمینه، بر مبنای ترکیب شیمیایی و استفاده از روابط مربوطه انجام شده است [3]. با توجه به این نتایج، محدوده دمایی ۱۵۰ الی ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد برای دنبال نمودن فرایند آستمپرینگ در مورد فولاد مورد بررسی، مناسب تشخیص داده شد. در ادامه تلاش می‌گردد تا نتایج حاصل به صورت جزئی مورد تحلیل قرار گیرد.

جدول (۱)، مقادیر سختی، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول مربوط به نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان استحالهٔ آستمپرینگ، به تدریج از مقدار سختی نمونه کاسته می‌شود. کاهش سختی با گذشت زمان، نشان دهنده انجام استحالهٔ هم‌دما و تبدیل مقادیری از آستنیت به بینیت می‌باشد. با وجودی که سختی با گذشت زمان کاهش می‌یابد، استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش زمان از ۹٦ به ۲۸۸ ساعت از حدود ۷۱۷ مگاپاسکال به حدود ۱۳۸٤ مگاپاسکال افزایش نشان می‌دهد. افزایش استحکام

نمونه با افزایش زمان عملیات آستمپرینگ تنها می‌تواند به کاهش تنش‌های پسماند ناشی از تشکیل تیغه‌های سخت مارتنزیت که موجب ترد و شکننده بودن ساختار می‌شود، نسبت داد. نکته دیگر قابل ذکر، درصد ازدیاد طول نزدیک به صفر نمونه‌هاست. این موضوع نشان از شکست ترد نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد دارد. در این ارتباط تصاویر سطح شکست نمونه‌ی آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۸۸ ساعت در شکل (۲) ارائه شده است. در شکل (۲-ب) سطوح جدایش مشاهده می‌شوند که دلیل اصلی ایجاد این جدایش می‌تواند وجود تیغه‌های مارتنزیت، تمرکز تنش در محل این تیغه‌ها و مرز دانه‌های آستنیت اولیه باشد. در واقع این تصاویر نیز تایید کننده‌ی انجام شکست نمونهٔ مورد بررسی به صورت ترد است.



(الف)



(ب)

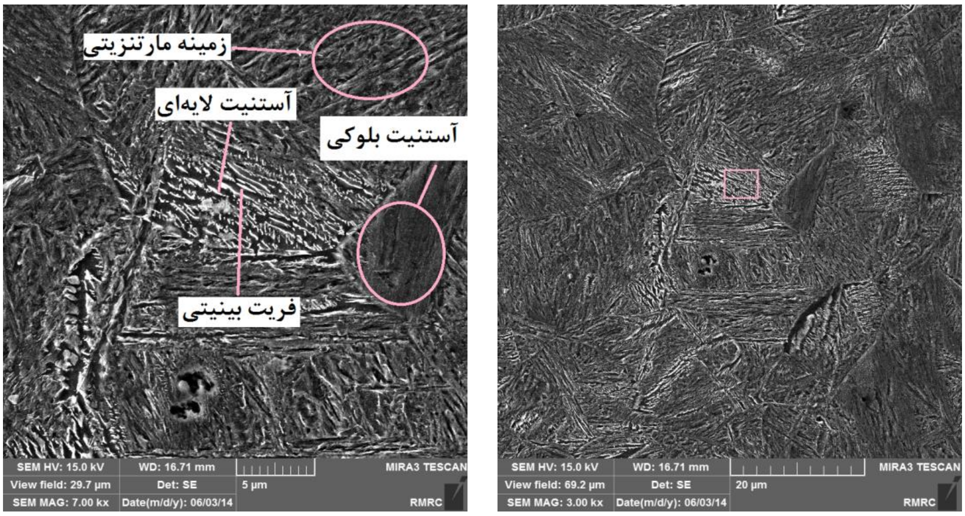
شکل ۲ تصاویر سطح شکست مربوط به نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۲۸۸ ساعت در دو بزرگنمایی مختلف

جدول ۱ سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

	زمان (ساعت)					
	صفر	۲٤	٤۸	۹٦	۱۹۲	۲۸۸
سختی (ویکرز)	۵۷۰±۵	۵٤۰±۷	۵۳۲±۳	۵۰۵±۱۰	٤۹۵±۲	٤۸۰±۵
استحکام (مگاپاسکال)	–	–	–	۷۱۷±۲۰	۱۳۵۸±۲۵	۱۳۸٤±۱۵
ازدیاد طول نسبی (درصد)	–	–	–	صفر	صفر	صفر

در راستای تحلیل ساختاری و فازی نمونه‌های مورد بررسی، تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی و الگوی پراش پرتوایکس مربوط به این نمونه پس از انجام آستمپرینگ در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۲۸۸ ساعت به ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار نمونه‌ی مورد بحث شامل فازهای مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و فریت بینیتی می‌باشد. بدین معنی که با انجام عملیات حرارتی همدما در مورد نمونهٔ مورد بحث به مدت زمان ۲۸۸ ساعت، به تدریج استحاله تشکیل بینیت دنبال شده، اما در این مدت کامل نشده است. آستنیت باقیمانده در این ساختار دارای دو مورفولوژی مختلف شامل آستنیت باقیمانده بلوکی و آستنیت باقیمانده لایه‌ای می‌باشد. آستنیت باقیمانده لایه‌ای یکی از مشخصه‌های مربوط به فولادهای نانوساختار بینیتی است و حضور آن باعث افزایش انعطاف‌پذیری ساختارهای حاصل می‌شود. این در حالی است که حضور آستنیت بلوکی که به دلیل تشکیل بینیت حاوی درصد قابل توجهی کربن است، انعطاف‌پذیری را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این رابطه درصد آستنیت باقیمانده به همراه درصد کربن آستنیت باقیمانده در جدول (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است که درصد آستنیت باقیمانده و همچنین درصد کربن آستنیت بر مبنای الگوهی پراش پرتوایکس و بر اساس روش استاندارد داخلی و محاسبه پارامتر شبکه انجام شد [15] (حداکثر میزان خطای محاسبات در این مورد ۵ درصد برآورد شد). همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش زمان آستمپرینگ از مقدار آستنیت باقیمانده کاسته و بر درصد کربن آن افزوده شده است. البته پس از گذشت ۲۸۸ ساعت از زمان عملیات باز هم درصد قابل توجهی از آستنیت در ساختار حضور دارد. در واقع آستنیت بلوکی بسیار ناپایدار بوده و تحت اعمال تنش سریعا به مارتنزیت استحاله می‌یابد. تشکیل مارتنزیت تمپر نشده در نمونه‌های حاصل، دلیل اصلی عدم انعطاف‌پذیری نمونه‌های مورد بررسی است. نکته دیگر قابل توجه در جدول (۲)، تغییرات ناچیز درصد آستنیت باقیمانده با افزایش زمان آستمپرینگ از حدود ۲٤ ساعت است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن آستنیت، پایداری این فاز افزایش یافته و انجام استحاله در این دما به شدت زمان‌بر است. در این راستا تلاش شد تا انجام فرایند در دماهای بالاتر دنبال شود.

مقادیر سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول مربوط به نمونه‌های فولادی پس از انجام آستمپرینگ در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. با مقایسهٔ مقادیر موجود در این جدول با مقادیر ارائه شده در جدول (۱)، به خوبی مشخص است که افزایش درصد بینیت تشکیل شده در ساختار، منجر به کاهش سختی نمونه شده است. مشابه قبل در این مورد نیز با افزایش زمان آستمپرینگ، استحکام افزایش یافته ولی انعطاف‌پذیری نمونه همچنان ناچیز است. در واقع در این مورد نیز شکست تمامی نمونه‌ها به صورت ترد صورت گرفته است. تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نمونه آستمپر شده در این دما به مدت زمان ۱۹٦ ساعت (شکل ۵)، گواه بر این ادعا است. اگر چه طبق شکل (۵–ب) در برخی مناطق، نواحی دیمپلی‌شکل مشاهده می‌شود، ولی سطوح جدایش کاملاً مشخص هستند. در مجموع تردی شکست این نمونه نسبت به حالت استحاله هم‌دما در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کم‌تر است.

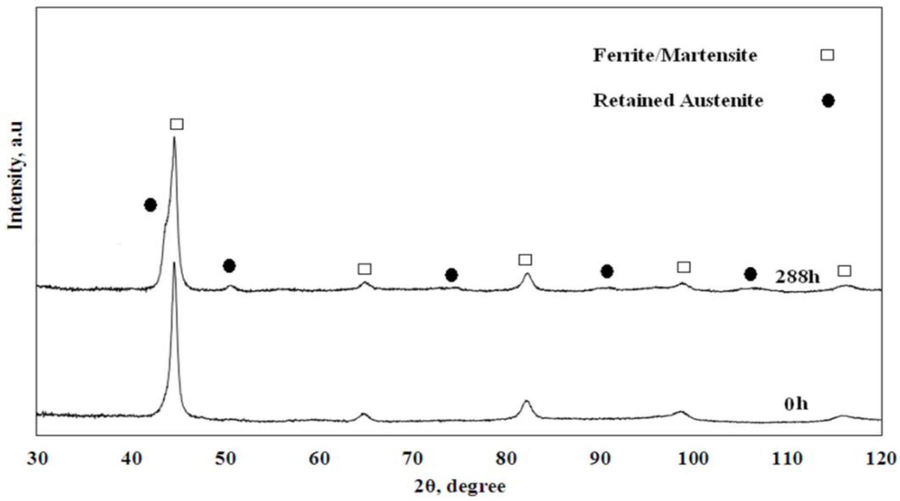


(ب) (الف)

شکل ۳ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از نمونۀ آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجۀ سانتی‌گراد به مدت ۲۸۸ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف

جدول ۲ درصد حجمی آستنیت باقیمانده و درصد کربن این فاز در مورد نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجۀ سانتی‌گراد در مدت زمان‌های مختلف (میزان خطای محاسبات در هر مورد در حدود ۵ درصد می‌باشد)

	زمان آستمپرینگ (ساعت)				
	صفر	۱	۲٤	۹٦	۲۸۸
درصد حجمی آستنیت باقیمانده	صفر	٤۲/۲	۳۷/۸	۳۷	۳٦/٤
درصد کربن آستنیت باقیمانده	–	۱/٦	۱/۸۳	۱/۸٤	۱/۸۷

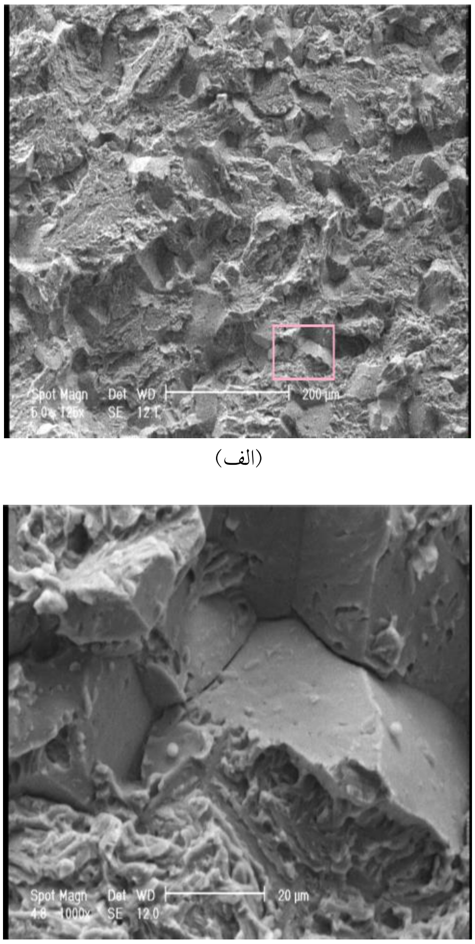


شکل ٤ الگوهای پراش پرتوایکس نمونۀ آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجۀ سانتی‌گراد به مدت صفر و ۲۸۸ ساعت

جدول ۳ سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

	زمان (ساعت)					
	صفر	۲٤	٤٨	۹٦	۱٤٤	۱۹۲
سختی (ویکرز)	۵۷۰±۵	۵۳۰±۳	۵۰۵±۱۵	٤٨٣±۲	٤٦٢±۳	٤۵۰±۵
استحکام (مگاپاسکال)	–	–	۵٦٤±۳۵	٨٦٨±۲۰	۱۱۵۳±۲۵	۱۷۷۱±۱۰
ازدیاد طول نسبی (درصد)	–	–	صفر	صفر	صفر	صفر

در این مورد نیز مطالعات ساختاری و فازی مربوط به نمونه آستمپر شده به مدت ۱۹٦ ساعت انجام شد. شکل‌های (٦) و (۷) به ترتیب تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی و الگوی پراش پرتوایکس مربوط به این نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ساختار این نمونه نیز مشابه نمونهٔ قبل شامل فریت بینیتی به همراه آستنیت باقیمانده است. البته درصد آستنیت باقیمانده در این نمونه بسیار کم‌تر از نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. در هر حال حضور آستنیت باقیمانده بلوکی شکل در این نمونه نیز دلیل اصلی انعطاف‌پذیری ناچیز ساختارهای حاصل بوده و نشان از کامل نشدن استحاله در این شرایط دارد. اگرچه با ادامه فرایند آستمپرینگ در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد، احتمال انجام واکنش به صورت کامل وجود دارد، به دلیل کند بودن انجام استحاله در این دما، تلاش شد تا فرایند در دمای بالاتری دنبال شود. در این رابطه گزارشاتی توسط محققین مختلف ارائه شده که همگی نشان از انجام کامل استحالهٔ تشکیل بینیت در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های طولانی دارد. به عنوان نمونه داس و همکاران [16] در طراحی فولادهای نانوبینیتی با استحکام بالا، با استحاله هم‌دما در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷ روز موفق به حصول استحکام کششی ۱۳۸۵ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ۲۰ درصد شدند. البته استحکام پایین این فولاد به درصد کربن پایین آن مربوط می‌باشد. تیموخینا و همکاران نیز استحکام کششی در حدود ۲۱۵۰ الی ۲۲۵۰ مگاپاسکال و استحکام تسلیم در حدود ۱۸۵۰ الی ۱۹۵۰ مگاپاسکال را پس از آستمپرینگ ترکیب 0.79 C–1.5 Si–1.98 Mn–0.98 Cr–0.24 Mo–1.06 Al–1.58 Co (wt.%) در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۰ روز گزارش نمودند [9]. وجود عنصر کبالت و هم‌چنین کربن در حدود ۰/۸ درصد وزنی، باعث دست‌یابی به استحکام بالا شده است.



(الف)

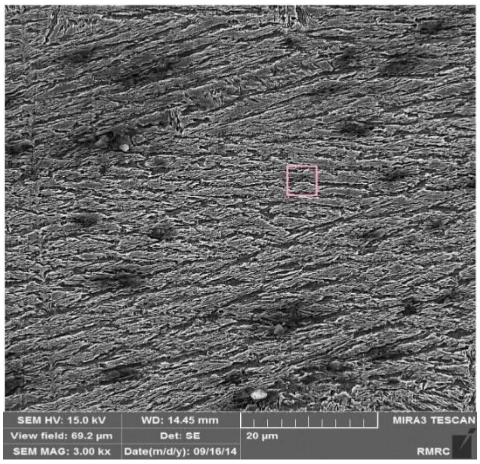
(ب)

شکل ۵ تصاویر سطح شکست مربوط به نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۲۸۸ ساعت در دو بزرگنمایی مختلف

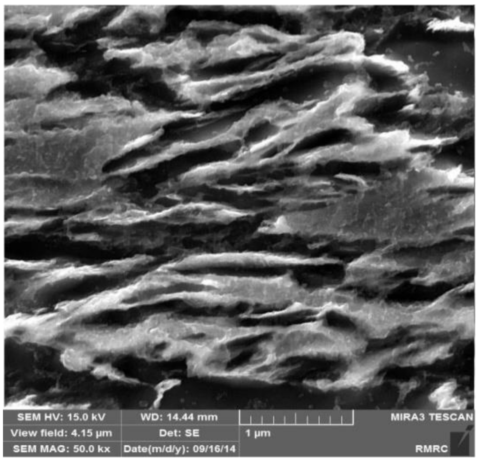
جدول ٤ سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

	زمان (ساعت)					
	صفر	۱	۲٤	٤۸	۷۲	۹٦
سختی (ویکرز)	۵۷۰±۵	۵۲۰±۵	٤۹۰±۱۱	٤٤۵±۷	٤۲۵±۵	٤۲۰±۷
استحکام (مگاپاسکال)	-	۵۷٦±۳۵	۱۵۸۸±٤۰	۲۰۰٦±۱۵	-	۲۰۲٤±۳۰
ازدیاد طول نسبی (درصد)	-	-	صفر	٤/۲±۰/۳	-	۷/۲۵±۰/۷

مقادیر سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول مربوط به نمونه‌های فولادی پس از انجام آستمپرینگ در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. با مقایسهٔ مقادیر موجود در این جدول با مقادیر ارائه شده در جدول (۱)، به خوبی مشخص است که افزایش درصد بینیت تشکیل شده در ساختار، منجر به کاهش سختی نمونه شده است. مشابه قبل در این مورد نیز با افزایش زمان آستمپرینگ، استحکام افزایش یافته ولی انعطاف‌پذیری نمونه همچنان ناچیز است. در واقع در این مورد نیز شکست تمامی نمونه‌ها به صورت ترد صورت گرفته است. تصاویر میکروسکپی مشابه نمونه‌های قبل، خواص مکانیکی مربوط به نمونه آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف در جدول (٤) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در استحاله هم‌دما به‌مدت یک و ۲٤ ساعت مشابه نمونه‌های آستمپر شده در دماهای ۱۵۰ و ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد انعطاف‌پذیری نزدیک صفر است و شکست در ناحیه کشسان رخ داده است (شکل ۸-الف). این مسأله بیانگر حضور درصد بالای آستنیت باقیمانده بلوکی و مارتنزیت در ساختار است. با افزایش زمان آستمپرینگ به ٤۸ ساعت، نمودار تنش- کرنش وارد ناحیهٔ تغییر شکل پلاستیک شده، استحکام به حدود ۲۰۰٦ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی به حدود ٤/۲ درصد می‌رسد. با افزایش بیشتر زمان نگه‌داری در این دما تا ۹٦ ساعت، استحکام و ازدیاد طول نسبی افزایش بیشتری یافته و به ترتیب به حدود ۲۰۲٤ مگاپاسکال و ۷/۲۵ درصد می‌رسد. همان‌گونه که در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود درصد بالایی نواحی دیمپلی شکل در سطح مقطع این نمونه ظاهر شده است. در واقع حضور دیمپل‌ها مشخصه شکست نرم است و نشان می‌دهد که نوع شکست پس از انجام استحاله هم‌دما در ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۹٦ ساعت، نرم بوده است.

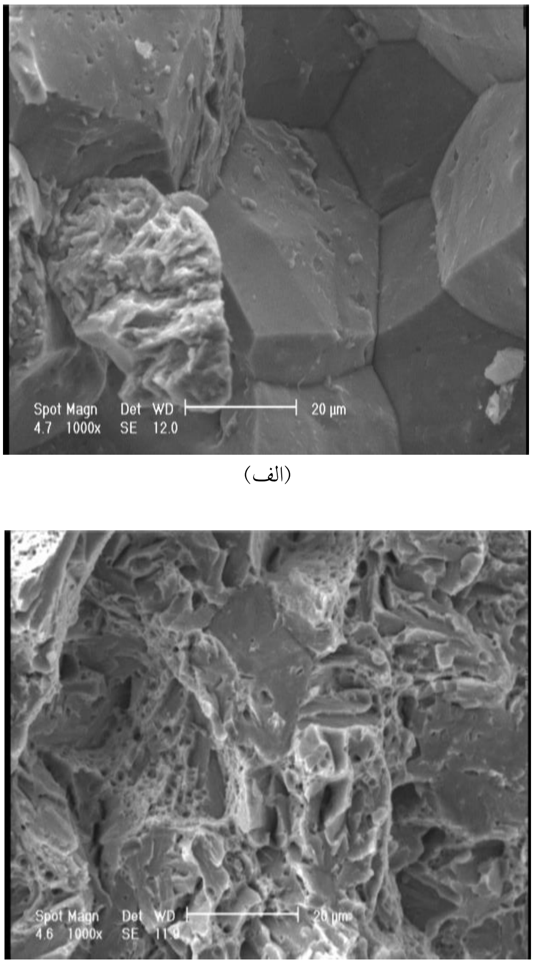


(الف)



(ب)

شکل ٦ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۱۹٦ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف



(الف)

(ب)

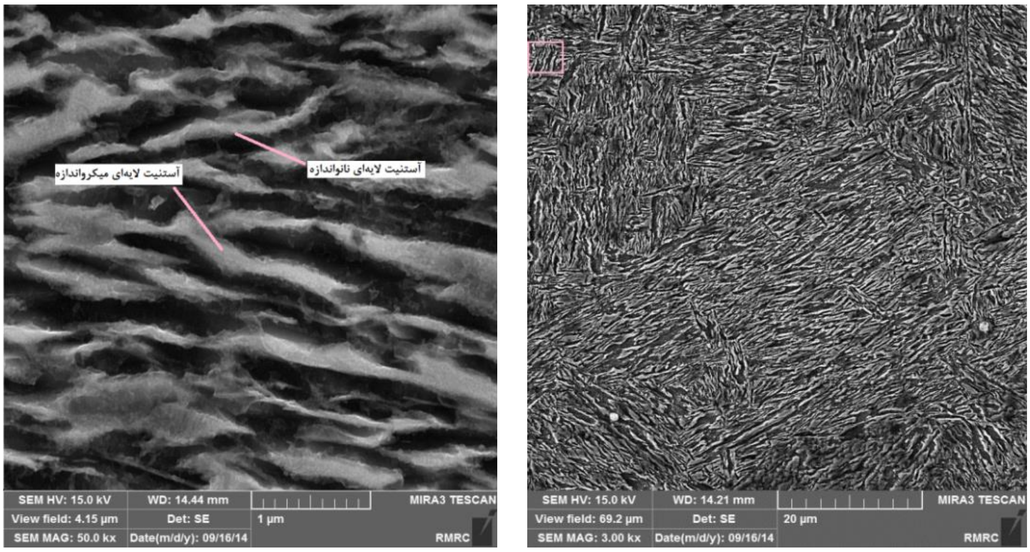
شکل ۸ تصاویر سطح شکست مربوط به نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت الف) ۲٤ ساعت و ب) ۹٦ ساعت

در راستای تحلیل دقیق این موضوع و علت اصلی افزایش استحکام و درصد ازدیاد طول نسبی در مورد نمونه‌ی آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی به همراه الگوی پراش پرتوایکس مربوط به نمونهٔ آستمپر شده به مدت ۹٦ ساعت به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. در مقایسهٔ این نمونه با نمونه‌های آستمپر شده در دماهای پایین‌تر به خوبی مشخص است که در الگوی پراش این نمونه نشانی از حضور فاز آستنیت وجود ندارد. بدین معنی که به نظر می‌رسد استحاله تشکیل بینیت در این شرایط به پایان رسیده باشد. با مشاهدهٔ تصاویر میکروساختاری مربوط به این نمونه، به خوبی ساختار لایه‌ای متشکل از فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده که مشخصهٔ اصلی ساختارهای نانوبینیتی است، شکل گرفته است. با توجه به حضور لایه‌های آستنیت در میان صفحات بینیت در شکل‌های میکروسکپی و عدم حضور پیک‌های این فاز در الگوهای پراش، به نظر می‌رسد که پیک‌های مربوط به آستنیت در نمونه‌های قبل تنها مربوط به آستنیت بلوکی باشد. در هر حال، حذف آستنیت بلوکی و ایجاد ساختار لایه‌ای از آستنیت و فریت بینیتی، دلیل اصلی افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها تحت این شرایط بوده است. لایه‌های آستنیت غنی از کربن برخلاف آستنیت بلوکی مانع رشد ترک می‌شوند. همچنین این لایه‌ها صفحات فریت را مانند سوزن‌هایی در زمینه نگه می‌دارند. در هر حال ضخامت کم صفحات فریت بینیتی نیز از دیگر دلایل استحکام قابل توجه نمونه‌های مورد بررسی است [6-8].

شایان ذکر است که نتایج حاصل در مورد این فولاد، با نتایج حاصل از نمونه‌های فولادی طراحی شده توسط محققین مختلف قابل رقابت است. به عنوان نمونه ماتئو و همکاران به‌منظور بررسی رفتار فولاد نانوساختار بینیتی با ۳ درصد سیلیسیم، استحاله هم‌دما را در دو دمای ۲۲۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند [7]. آن‌ها برای دو دمای ۲۲۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب استحکام کششی ۲۲۸۷ و ۲۰٦۷ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ٤/۷ و ۳/۲۱ را گزارش دادند. با وجودی که فولاد AISI 52100 در مقایسه با این کار تحقیقاتی دارای عناصر آلیاژی محدودی می‌باشد، خواص مکانیکی حاصل و به خصوص انعطاف‌پذیری قابل رقابت با آن است. این نکته می‌تواند نویدبخش امکان استفاده از این فولاد تجاری به جای گروه‌های فولادی جدید با طراحی خاص باشد. البته در مورد فولاد AISI 52100 نیز تلاش‌هایی در جهت شکل‌گیری ساختارهای بینیتی صورت گرفته است. به عنوان مثال چاکربورتی و همکاران فرایند آستمپرینگ را به‌منظور دست‌یابی به خواص مکانیکی مناسب‌تر در مورد این فولاد دنبال نمودند [13]. این محققین دما و زمان

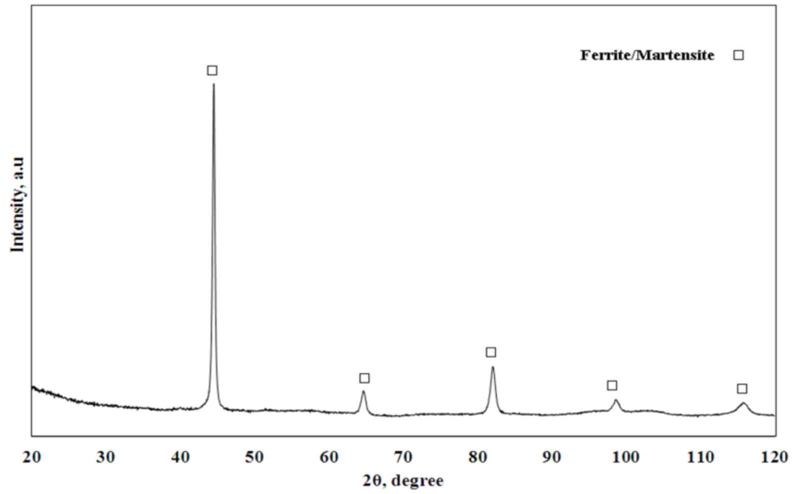
بهینه‌ی آستمپرینگ در مورد این فولاد را به‌ترتیب ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ دقیقه گزارش نمودند. انجام فرایند در شرایط یاد شده منجر به حصول ریزساختار دوتایی مارتنزیت و بینیت با سختی ٦۲ راکول‌سی و استحکام کششی ۲۲۵۰ مگاپاسکال گردید. ریزساختار مورد نظر این محقق مارتنزیتی- بینیتی بوده که از استحکام و سختی بالاتری در مقایسه با نمونهٔ بینیتی حاصل از این پژوهش است. البته شایان ذکر است که انعطاف‌پذیری حاصل از نمونه‌ی مورد بررسی توسط این محققین به مراتب کم‌تر از فولاد نانوبینیتی حاصل بوده است.

در راستای تکمیل مباحث مطرح، خواص مکانیکی نمونه‌های فولادی آستمپر شده در دمای ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای آستمپرینگ، مقادیر استحکام کششی در دو زمان ٢٤ و ٤٨ ساعت به‌ترتیب به حدود ۱۷۵٦ و ۱۷۳۹ مگاپاسکال و میزان ازدیاد طول به‌ترتیب به حدود ٦/۳۵ و ۵ درصد رسیده است. در واقع کاهش استحکام کششی با افزایش دمای آستمپرینگ، به تغییر ریخت بینیت و عدم وجود ساختار لایه‌ای بینیت در این حالت مرتبط می‌باشد (شکل ۱۱). این نتایج در تطابق با کار آویشان و همکاران قرار دارد. این محققین نیز نشان دادند که با افزایش دمای استحاله هم‌دما از ۲۰۰ به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست افزایش و مجدداً در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد [17]. در این کار تحقیقاتی نیز تغییر ریخت بینیت علت اصلی کاهش انعطاف‌پذیری و استحکام معرفی شده است. در همین رابطه، شرما [18] نیز با انجام استحاله هم‌دما در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در مورد فولادی با ترکیب شیمیایی Fe-0.47C-1.22Si-1.07Mn-0.04Ni-0.01Mo-0.7Cr-0.01S-0.01Al-0.01P به استحکام کششی نسبتاً پایین ۱۵۵۰ مگاپاسکال دست یافت.



(الف) (ب)

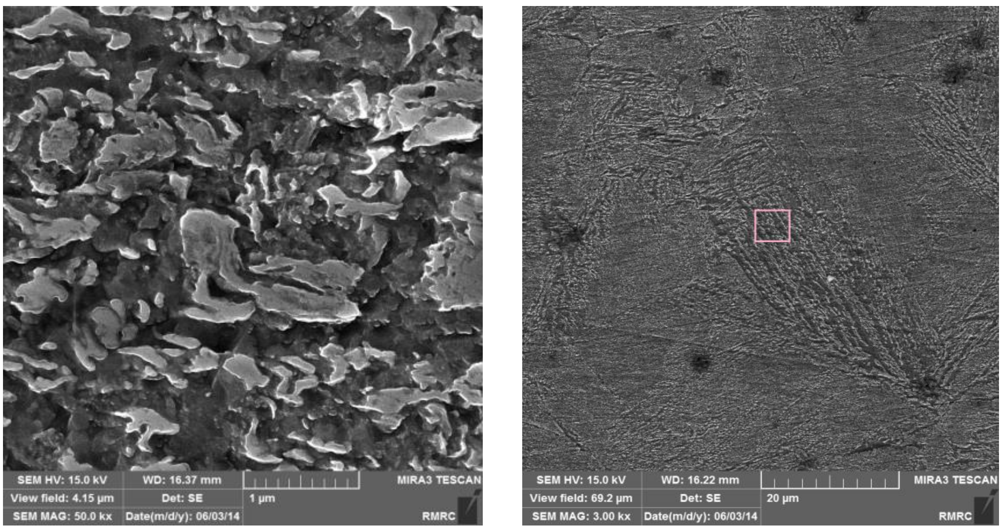
شکل ۹ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۹٦ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف



شکل ۱۰ الگوی پراش پرتوایکس نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۹٦ ساعت

جدول ۵ سختی، استحکام و درصد ازدیاد طول نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

	زمان (ساعت)			
	صفر	۱	۲٤	٤٨
سختی (ویکرز)	۵۷۰±۵	٤۷۲±۲	٤۲۳±۵	٤۲۰±۵
استحکام (مگاپاسکال)	–	–	۱۷۵٦±۲۵	۱۷۳۹±۱۲
ازدیاد طول نسبی (درصد)	–	–	٦/۳۵±۰/۲	۵±۰/۵



(الف) (ب)

شکل ۱۱ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ٤٨ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف

جدول ٦ مقایسه خواص مکانیکی فولاد AISI 52100 در دو حالت تندسرمایی–بازپخت‌شده و آستمپر شده

نمونه	ساختار	خواص			
		سختی (ویکرز)	استحکام (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول نسبی	نرخ سایش (mg/km)
تندسرمایی–بازپخت‌شده [۱۹]	فریت+ کاربید	٦۰۰±۲۰	۱۸۵۰±۵۳	۲±۰/۵	٤/۹±۰/۱
آستمپر شده	فریت بینیتی+آستنیت	٤۲۰±۷	۲۰۲٤±۳۰	۷/۲۵±۰/۷	۵/۲±۰/۲

همانگونه که مشاهده شد، بالاترین خواص ریزساختارهای حاصل از فرایند آستمپرینگ در مورد فولاد مورد بحث، مربوط به نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۹٦ ساعت می‌باشد. با توجه به این‌که فولاد AISI 52100 یک فولاد تجاری است و در حالت تندسرمایی– بازپخت‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد، تلاش شد تا خواص مکانیکی و ساختاری این فولاد در حالت معمول (عملیات حرارتی تندسرمایی– بازپخت‌شده [۱۹]) و با ساختار بینیتی بهینهٔ حاصل از این پژوهش (نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۹٦ ساعت) با یکدیگر مقایسه شود. در این رابطه، خواص مکانیکی این دو محصول در جدول (٦) مقایسه شده است. با توجه به این جدول، سختی نمونهٔ تندسرمایی– بازپخت‌شده به مراتب بالاتر از نمونهٔ آستمپر شده می‌باشد اما استحکام کششی و درصد ازدیاد طول آن بسیار کم‌تر از آن است. دلیل استحکام کم نمونهٔ بازپخت شده نسبت به نمونه‌ی آستمپر شده می‌تواند به انعطاف‌پذیری پایین‌تر آن نسبت داده شود. این نکته قابل تامل است که با وجود انعطاف‌پذیری و استحکام بالاتر نمونهٔ آستمپر شده در مقایسه با نمونهٔ دیگر، زمان فرایند آستمپرینگ در این مورد ۹٦ ساعت می‌باشد که بسیار طولانی‌تر از زمان عملیات حرارتی در مورد نمونهٔ تندسرمایی–بازپخت (۳۰ دقیقه) شده است. به منظور مقایسهٔ خواص سایشی نمونه‌های مورد بحث، نمودار کاهش وزن– مسافت سایش مربوط به نمونه‌های یاد شده در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تفاوت چندانی میان خواص سایشی دو نمونه وجود ندارد. اگرچه این موضوع با توجه به تفاوت سختی دو نمونه قابل توجیه نیست، به نظر می‌رسد انعطاف‌پذیری بالای نمونهٔ آستمپر شده (با وجود سختی کم‌تر)، منجر به نزدیک شدن نرخ سایش آن به مقدار نرخ سایش نمونه دیگر شده باشد. در ضمن با توجه به مشابه بوده جنس پین سایش با جنس نمونه‌های مورد آزمایش، مکانیزم سایش مجموعه‌ای از سایش خراشان و چسبان تشخیص داده شد (شکل ۱۳).

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به‌صورت زیر خلاصه شده‌اند:

۱. حضور آستنیت بلوکی شکل در ریزساختار نمونه‌های آستمپر شده در دماهای کم‌تر از ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، دلیل اصلی انعطاف‌پذیری ناچیز نمونه‌های حاصل است.

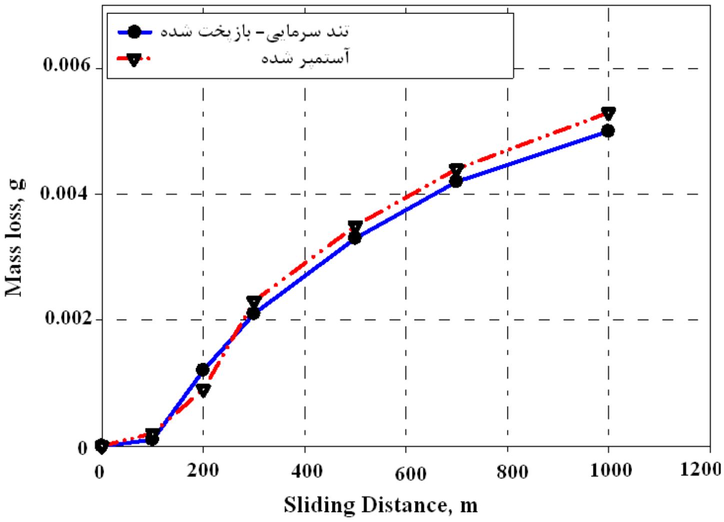
۲. با افزایش دمای استحاله آستمپرینگ به بیش از ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، آستنیت بلوکی حذف شده و انعطاف‌پذیری به شدت افزایش می یابد.

۳. از بین نمونه‌های آزمایش شده، بیش‌ترین مقدار استحکام کششی و ازدیاد طول مربوط به استحاله در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۹٦ ساعت است. در این حالت استحکام کششی به بیش از ۲۰۰۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول به بیش از ۷ درصد می‌رسد.

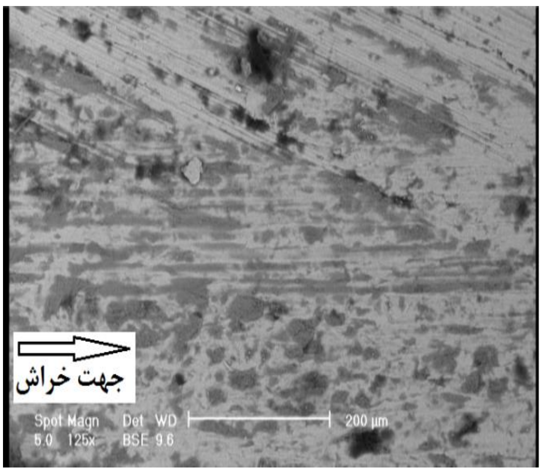
٤. با بررسی سطوح شکست مشخص شد به‌طور کلی در هیچ‌کدام از شرایط استحاله هم‌دما شکست کاملاً نرم نبوده است. اما استحاله در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۹٦ ساعت بهترین حالت از لحاظ نرمی شکست بوده است.

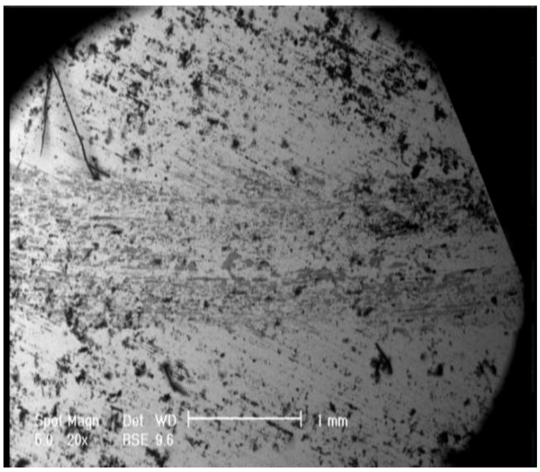
٥. افزایش دمای آستمپرینگ به حدود ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد منجر به تغییر ریخت بینیت شده و کاهش انعطاف‌پذیری و استحکام را به دنبال دارد.

٦. سختی نمونه‌های فولادی در حالت آستمپر شده و تندسرمایی- بازپخت شده، بالاتر از نمونهٔ آستمپر شده می‌باشد اما استحکام و انعطاف‌پذیری این فولاد در حالت آستمپر شده به مراتب بالاتر از نمونه‌ی دیگر است. در ضمن مقاومت سایش فولاد آستمپر شده بسیار نزدیک به فولاد تند سرمایی- بازپخت شده است.



شکل ۱۲ نمودار کاهش وزن- مسافت سایش در مورد نمونهٔ فولاد AISI 52100 در دو حالت تندسرمایی-بازپخت‌شده و آستمپر شده





(ب) (الف)

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونهٔ آستمپر شده در دمای ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۹٦ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف

مراجع

1. Burrier H., "ASM Handbook: Properties and Selection of Iron Steels and High Performance Alloys", *ASM International*, USA, (1987).
2. Weber H., Laird W.J., "ASM Metals Handbook: Martempering of Steel", *ASM International*, USA, (1991).
3. Chandler H., "Heat Treaters Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels", *ASM International*, USA, (1995).
4. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., Mawalla K.J.A., Jones D.G., Brown P., "Very strong low temperature bainite", *Materials Science and Technology*, Vol. 18, pp. 279-284, (2002).
5. Whang S.H., "Nanostructured Metals and Alloys, Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications", *Woodhead Publishing Limited*, USA, (2011).
6. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., "Very strong bainite", *Current Opinions in Solid State Materials Science*, Vol. 8, pp. 251-257, (2004).
7. Mateo C.G., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., "Development of hard bainite", *ISIJ International*, Vol. 43, pp. 1238-1243, (2003).
8. Bhadeshia H.K.D.H., “Nanostructured bainite”, *Mathematical Physical and Engineering Science*, Vol. 466, pp. 3-18, (2009).
9. Timokhina I.B., Beladi H., Xiong X.Y., Adachi Y., Hodgson P.D., “Nanoscale microstructural characterization of a nanobainitic steel”, *Acta Materialia*, Vol. 59, pp. 5511-5522, (2011).
10. Krishna P.V., Srikant R.R., "Effect of austempering and martempering on the properties of AISI 52100 Steel", *ISRN Tribology*, Vol. 11, pp. 1-6, (2013).
11. Akbasoglu F.C., Edmonds D.V., "Rolling contact fatigue and fatigue crack propagation in 1C-1.5Cr bearing steel in the bainitic condition", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21, pp. 889-893, (1990).
12. Beswick J., "Fracture and fatigue crack propagation properties of hardened 52100 steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20, pp. 1961-1973, (1989).
13. Chakraborty J., Bhattacharjee D., Manna I., "Austempering of bearing steel for improved mechanical properties", *Scripta Materialia*, Vol. 59, pp. 247-250, (2008).
14. Zhao J., Wang T.S., Lv B., Zhang F.C., "Microstructures and mechanical properties of a modified High-C-Cr bearing steel with nano-scaled bainite", *Materials Science & Engineering*, Vol. 23, pp. 325-341, (2014).
15. Cullity B.D., "Elements of X-ray Diffraction", *Addison-Wesley Publishing Company*, London, (1956).
16. Das S., Haldar A., “Continuously cooled ultrafine bainitic steel with excellent strength–elongation combination”, *Metals & Materials Society and ASM International*, Vol. 66, pp. 23-31, (2014).
17. Avishan B., Yazdani S., Hossein-Nedjad S., “Toughness variations in nanostructured bainitic steels”,

Materials Science and Engineering A, Vol. 548, pp.106-111, (2012).

18. Sharma S., Sangal S., Mondal K., "Development of new high-strength carbide-free bainitic steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, pp. 3921-3933, (2011).

۱۹. سلطانمرادی ، "بررسی اثر زمان نگهداری در دمای عملیات برودتی بر ساختار میکروسکپی و خواص مکانیکی فولاد AISI 52100"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد فلزی)، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، (۱۳۹۲).